

대규모 발파자료를 이용한 한반도 남부 상부지각의 종파 속도 이방성

홍명호 · 김기영 *

강원대학교 지구물리학과

P-wave Velocity Anisotropy in the Upper Crust of the Southern Korean Peninsula Using Seismic Signals from Large Explosions

Myung Ho Hong and Ki Young Kim*

Department of Geophysics, Kangwon National University

요 약: 한반도 지각속도 구조 규명을 위해 실시하고 있는 지각규모 탄성과 실험의 일환으로 한반도 지각구조 연구팀이 2004년도와 2008년도에 조사측선상의 각 4개소와 8개소에서 인공적으로 대규모 지진파 신호를 발생시켰으며, 이 지진파 신호들이 기상청 지진망의 고정관측소 지진계에 기록되었다. 43개 속도센서와 103개 가속도센서로 기록된 고정관측소 자료 중, 신호/잡음비가 양호한 진앙거리 120 km 이내의 156개 자료만을 대상으로 Pg 위상의 속도 이방성을 분석하였다. 상대고도보정은 KCRT-2004 자료분석을 통해 구한 지표부근 속도정보와 고정관측소와 측선상의 이동식 관측소 사이의 고도차이를 이용하여 구하였으며, -101.6 ~ 105.3 ms의 범위를 갖는다. 부지효과를 제거하기 위한 관측소 잔여보정은 가능한 모든 방향의 발파자료를 대상으로, 고정관측소 주시와 이동관측소 주시의 차이를 발파점별로 평균한 값을 제거하는 방법으로 구하였으며, -89.6 ~ 192.2 ms 범위를 갖는다. 추가령 지구대와 옥천계 구조선 방향으로 나타나는 빠른 속도 이상대와 영덕과 울산 부근 높은 지열대의 느린 속도 이상대를 제외하면, Pg 위상으로 구한 한반도 남부의 상부지각속도는 전반적으로 등방성임을 지시한다.

주요어: 속도 이방성, Pg 위상, 고정관측소, 고도보정, 관측소 잔여보정

Abstract: As part of seismic experiments investigating crustal velocity structures of the Korean peninsula, permanent (fixed) seismographs of the Korea Meteorological Administration (KMA) network recorded seismic signals from four and eight large explosions in Korean Crustal Research Team (KCRT) profiles shot in 2004 and 2008, respectively. Among the seismograms recorded by 43 velocity sensors and 103 accelerometers at KMA stations distributed throughout the southern Korean Peninsula, 156 records with epicentral distances less than 120 km and high signal-to-noise ratios were analyzed to determine velocity anisotropy of the Pg phase. Relative elevation corrections of -101.6 to 105.3 ms were made using velocity information derived from the 2004 KCRT profile data and differences in elevation between the permanent KMA stations and the temporary stations in the KCRT profiles at the same source-receiver offsets. To remove site effects, receiver-station corrections of -89.6 to 192.2 ms were additionally made to the KMA station data by subtracting the average differences in traveltimes between KMA stations and portable stations at the same offsets for all available shots with different azimuths. With the exception of anomalously fast velocities along trends of the Chugaryeong fault zone and the Okchon fold belt and anomalously slow velocities in the regions of high terrestrial heat near Yeongduk and Ulsan, the analysis of crustal velocity anisotropy using the Pg phase indicates overall isotropy in the southern half of the Korean peninsula.

Key words: velocity anisotropy, Pg phase, permanent station, elevation correction, receiver-station correction

서 론

정밀한 지질구조 해석을 위해서는 지각의 특성과 응력/변형의 방향성을 지시하는 이방성 연구가 중요지만, 한반도 이방성

에 대한 정량적인 연구는 옥천계에서 실시한 전기비저항 탐사(이춘기 외, 2007)를 제외하면 거의 전무한 상황이다. 균열면이나 방향성을 갖는 매질에서는 탄성과 속도가 변화를 보이기 때문에(Hudson, 1981), 지각규모의 이방성을 연구하는 좋은 방법 중 하나는 탄성과 속도를 이용하는 것이다. 지각규모의 속도 이방성은 상부지각과 하부지각에서 서로 다른 발생요인에 의하여 발생하는데, 10 ~ 15 km 깊이 이내에 나타나는 상부지각의 속도 이방성은 주로 파쇄대, 비균질 구조의 방향성, 공극의 방향, 암석내의 유체 등에 의한 것으로 알려져 있다

2009년 6월 19일 접수; 2009년 8월 4일 채택

*Corresponding author

E-mail: kykim@kangwon.ac.kr

Address: Address: 192-1 Hyoja-2-dong, Chunchon, Gangwon-do 200-701, Korea

(Babuska and Pros, 1984). 반면, 부분용융이 잘 발달된 하부지각과 최상부 맨틀의 경우 속도 이방성은 부분용융 후 전단응력에 의해 재배열되는 격자편향성(lattice preferred orientation, LPO)을 갖는 암석들에 의해 발달하며(Barruol and Kern, 1996), 서로 다른 속도를 갖는 얇은 등방성 층들이 교대로 나타나는 경우에도 전반적으로는 이방성 효과를 보이는 것으로 보고된 바 있다(Backus, 1965).

특히 횡파는 심부에서 이방성 매질에 따라 수평 및 수직 성분 속도가 분리되는 횡파분리(shear-wave splitting) 현상이 뚜렷이 나타나 주로 섭입과정과 관련된 연구에 활용되고 있다(Ando *et al.*, 1983; Savage, 1999; Silver and Chan, 1991). 그러나 횡파 자료는 낮은 신호/잡음비로 인하여 자료의 해석이 어렵고, 주파수 성분이 낮아 지각의 세밀한 이방성 문제를 해결하기에는 적합하지 않다. 따라서 최근에는 이러한 문제를 극복하기 위하여 대규모 발파로 획득한 광각 굴절/반사파 자료의 종파 속도를 이용한 이방성 연구가 실시되고 있다(Hess, 1964; Ishise and Oda, 2005; Rabbel and Mooney, 1996).

종파의 속도 이방성은 하부지각의 모호 이방성 연구(Carbonell and Smithson, 1991; Jones *et al.*, 1996), 아일랜드 지역의 상부지각 및 하부지각 이방성 연구(Jacob *et al.*, 1985) 등에 이미 적용된 바 있으며, 최근에는 토모그래피를 이용한 국부적인 지각의 이방성 연구에 사용되고 있다(Eberhart-Phillips and Henderson, 2004; Wang and Zhao, 2009; Zhao *et al.*, 1994). 경사가 수직인 단층이나 단열 등 지질구조의 경우, 즉 대칭축이 수평인 경우에 종파 속도는 경사방향보다 주향방향으로 빠르게 전파되는 특성이 있다(Thomsen, 1986).

능동적 방법을 이용한 한반도 지각 속도구조 연구는 2002년도에 KCRT-2002 측선을 따라 처음으로 시작되었으며, 2004년과 2008년에는 각각 KCRT-2004 측선과 KCRT-2008 측선상의 4개와 8개소에서 250 kg 내지 1500 kg의 폭약을 시추공에서 발파하는 실험을 실시하였다(Kim *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2009). 이 실험들에서 발생된 인공 지진에너지는 한반도 전역에 설치되어 있는 기상청 고정관측소의 속도 및 가속계에 기록되었으며, 부수적으로 기록된 이 자료들을 이용하여 한반도 남부 지각의 종파 속도 이방성을 분석할 수 있다. 이 연구에서는 대규모 발파로 획득한 KCRT-2004 측선자료, KCRT-2008 측선자료, 기상청 고정관측소에서 기록한 속도계 및 가속도계 센서 자료 등을 함께 이용하여 한반도 남부지역의 종파 속도 이방성을 분석하고자 한다.

한반도의 주요 지체구조

KCRT-2004와 KCRT-2008 측선은 한반도의 주요 지체구조인 경기육괴(GM), 옥천계(OF), 영남육괴(YM), 경상분지(GB) 등에 위치한다(Fig. 1). 다양한 지구구조운동을 받은 한반도는 복잡한 지질구조를 가지고 있으나, 비교적 안정지괴로 평가되고

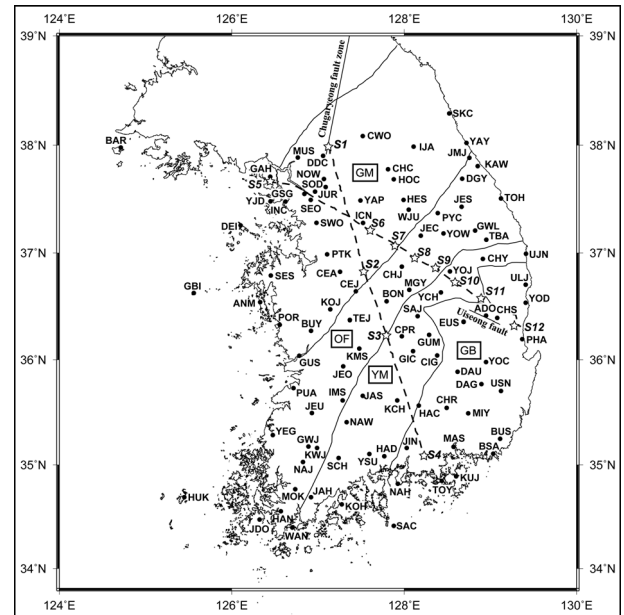


Fig. 1. Location map showing seismic profiles of KCRT-2004 (solid line) and KCRT-2008 (dash line) and 109 permanent stations (solid circles) in the southern Korean peninsula. Four and eight shots (empty stars) along the KCRT-2004 and KCRT-2008, respectively, are also indicated. The seismic profiles transverse the Gyeonggi massif (GM), Okchon fold belt (OF), Yeongnam massif (YM) and Gyeongsang basin (GB).

있다. 이 중, 경기육괴는 선캠브리아기의 경기편마암복합체와 춘성누층군 및 연천 누층군, 그리고 주라기의 대보화강암류로 구성되어 있으며, 북쪽은 임진강습곡대, 남쪽은 옥천계와 접한다(김정환 외, 1999). 경기육괴내에는 추가령지구를 비롯하여, 대보조산운동 후기에 형성된 주라기의 충남함몰대, 김포분지, 공주함몰대, 감천함몰대, 음성함몰대 등 함몰대 또는 퇴적분지가 주로 형성되어 있는 것이 특징이다. 또한 경기육괴는 선캠브리아기부터 주라기까지 약 3회에 걸쳐 변성작용의 영향을 받았다(나기창, 이동진, 1978). 한반도 남동부에 위치한 영남육괴는 주로 선캠브리아기의 편마암 또는 편암 복합체와 이를 관입한 주라기 및 백악기의 관입암체로 구성되어 있다(나기창, 이동진, 1978). 영남육괴는 외형적으로 경기육괴와 유사한 특징을 보이나, 지질시대와 층서 단위에 있어 상당한 차이를 보인다.

경기육괴와 영남육괴사이에서 북동-남서 방향으로 평행하게 발달하고 있는 옥천계는 옥천누층군, 허부 및 상부 고생대 지층, 중생대 지층과 화성암류 등으로 구성되어 있으며, 전단대를 수반한 구조선을 따라 여러 개의 백악기 퇴적분지가 발달되어 있다(김정환 외, 1999). 이들 백악기 퇴적분지는 우수향 이동단층운동에 수반하여 형성된 인리형 분지(pull-apart basin)이다(김정환 외, 1994a). 한반도의 남동부에 위치한 경상분지는 백악기-제 3기의 육성 퇴적층과 화산암류, 그리고 이들을 관입하는 불국사화강암으로 구성되어 있다. 경상분지의 두께는 KCRT-2002 자료를 이용한 토모그램 결과에서 약

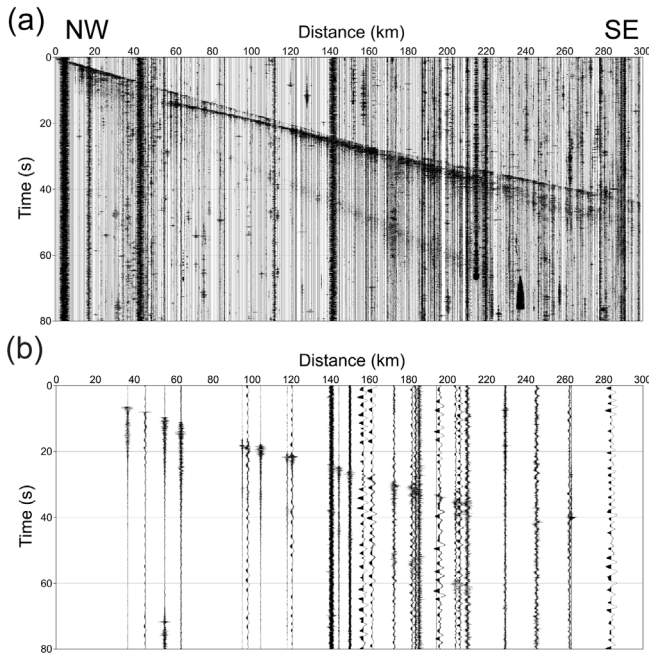


Fig. 2. Recorded data (a) along the KCRT-2008 profile and (b) at permanent stations on the KMA network for the shot at S5 (Ganghwa).

3.0 ~ 8.0 km 범위로 분포하며, 북서에서 남동 방향으로 두꺼워지는 것으로 보고되고 있다(Cho *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2007). 또한 이 지역은 대체로 단사구조를 이루며 북북동-남남서(연양-양산단층)와 서서북-동동남 단층에 의해 소지괴를 형성하기도 한다.

자료획득

한반도 지각 속도구조를 규명하기 위한 지각규모 굴절과 실험이 2002년도에 처음 실시된 이후, 2004년도에 335-km의 북북서-남남동 축선 KCRT-2004와 2008년도 299-km의 북서-남동 축선 KCRT-2008을 따라 실시되었다(Fig. 1). 대규모 인공지진파는 50 ~ 100 m 깊이의 시추공 내에서 250 ~ 1500 kg의 폭약으로 발생시켰으며, 한반도의 중앙부와 남해안 사이의 KCRT-2004 축선과 한반도의 서해안과 동해안을 가로지르는 KCRT-2008 축선의 발파위치는 연천(S1), 증평(S2), 영동(S3), 고성(S4), 강화(S5), 여주(S6), 충주(S7), 제천(S8), 단양(S9), 영주(S10), 안동(S11), 영덕(S12) 등이다(Fig. 1).

발생된 인공지진파 신호는 2004년도에 197개의 2-Hz 단성분 이동식 지진계(PRS-1)을 사용하여 120 Hz 샘플률로 기록한 반면, 2008년도에는 이동성 및 설치가 용이한 593개의 4.5 Hz 저주파 지오폰을 이용하여 250 Hz 샘플률로 기록하였다. 수신기는 KCRT-2004 축선과 KCRT-2008 축선을 따라 각각 평균 1.7 km와 0.5 km 간격으로 설치하였으며, 각 수신기 위치는 이동식 GPS를 이용하여 측정하였다. Fig. 2a는 발파점 S1에서 발생시킨 인공지진파를 KCRT-2008 축선상의 이동식

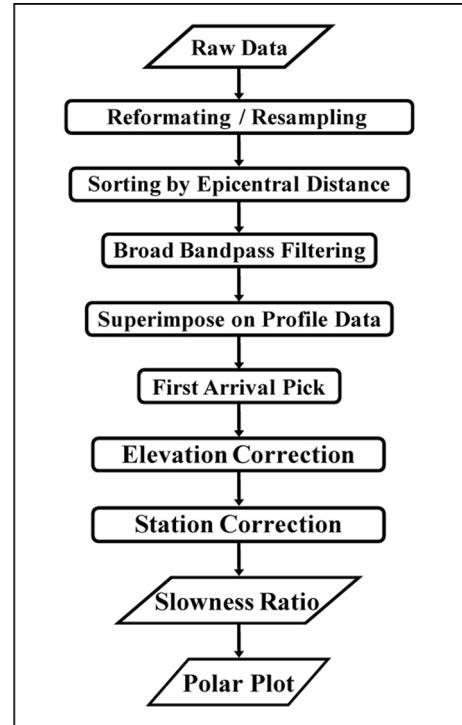


Fig. 3. Flowchart of the processing sequence for the present anisotropy study.

지진계에서 기록된 자료를 보여준다.

대규모 발파신호는 한반도 남부에 설치된 기상청 지진망의 43개 속도센서와 103개 가속도센서를 통하여 수신되었고 100 Hz 샘플률로 기록되었다. 이 중, 속도센서는 고유주기 0.01 ~ 50 Hz의 광대역 지진계 12개와 고유주기 1 Hz의 3성분 단주기 지진계 31개로 구성되어 있으며, 가속도센서는 모두 고유주기 1 ~ 2 Hz의 3성분 센서이다. 이 연구에서는 이들 자료 중 100 Hz로 기록된 수직성분만을 사용하였다. Fig. 2b는 발파점 S1에서 발생한 인공지진파 신호를 300 km 이내의 진앙거리를 갖는 속도센서로 수신된 고정관측소 기록자료이다. 진앙거리가 불규칙하고, 진앙거리가 멀수록 신호/잡음비가 감소하며, 관측소에 따라서 저주파 잡음이 심하게 기록된 모습을 보인다.

자료처리

획득한 자료의 산호/잡음비를 최대한 높이기 위하여 실시한 자료처리 과정은 자료변환, 재표본(resampling), 대역필터, Pg 위상주시 발체, 고도보정, 관측소 잔여보정 등의 순서로 실시하였다(Fig. 3).

자료 변환 및 재표본(resampling)

SEGY와 mini-seed 형태로 각각 기록되어 있는 KCRT 자료와 고정관측소 기록자료를 처리가 용이한 SEG2 포맷으로 변환하였다. 이후, 120, 250, 100 Hz의 서로 다른 샘플률로 기록

된 자료들을 ms 단위로 정확히 비교·분석하기 위하여, 120, 250 Hz의 자료들을 스플라인함수 내삽법(spline function interpolation)을 이용하여 100 Hz 샘플률로 변환하였다.

진앙거리별 분류

고정관측소 자료의 P_g 위상주기를 KCRT 자료와 비교하기 위하여, 고정관측소 자료를 각 발파마다 진앙거리별로 분류하여 P_g 위상주기를 분별하기 용이하게 하였다(Fig. 2b).

대역필터

고정관측소 자료의 스펙트럼 분석 결과 2 Hz 미만의 저주파 잡음이 강하게 기록되어 있고, 일부 자료에서는 직류성분에 의한 왜곡현상이 강하게 나타난다. 따라서 5 ~ 45 Hz의 대역필터를 적용하여 신호/잡음비를 향상시켰다.

P_g 위상 주시 발체

다중채널 지진과 자료에서 위상을 정확히 판정하기 위해서는 트레이스 사이의 일관성이 중요하다. 그러나 고정관측소 자료는 지진계의 수가 제한적이며 간격이 불규칙하여, 정확한 P_g 위상 주시를 인지하는데 어려움이 있다. 따라서 197개의 KCRT-2004 축선자료와 593개의 KCRT-2008 축선자료를 각 발파점별로 고정관측소 기록자료에 겹쳐 그리는 방법으로 고정관측소 자료의 P_g 위상 주시를 발체하였다. 고정관측소 진앙거리에 해당하는 이동관측소 주시는 해당 거리에 인접한 두 트레이스의 주시를 선형보간하여 구하였다.

상대 고도보정

동일한 거리의 축선 자료와 고정관측소 자료의 주시를 비교하기 전에 두 지점의 고도차이로 인하여 주시를 보정해 주어야 한다. 속도 V₁과 V₂를 갖는 층사이에 뚜렷한 굴절면이 존재할 경우, 속도가 빠른 균질한 매질 V₂층에서 굴절되어 지표에 도달한 파선의 상승각(rising angle)은 일반적으로 작은 값을 가진다(Fig. 4). 따라서 이때 두 수신기의 고도 보정량 Δt는

$$\Delta t = \frac{\Delta h \tan \theta_c}{V_2} - \frac{\Delta h}{V_1 \cos \theta_c} \tag{1}$$

이다. 그러나 하부층에서 이방성이 있을 경우, 축선방향과 고정관측소방향의 하부층 속도 V₂와 V₂'은 서로 다른 값을 가지므로, 동일한 거리에서 고도차를 보이는 두 수신기의 고도 보정량 Δt는

$$\Delta t = \frac{h_1}{V_1 \cos \theta_c} - \left(\frac{x_2 - x_1}{V_2'} + \frac{h_2}{V_1 \cos \theta_c'} \right) \tag{2}$$

로 표시되며, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta t = \frac{h_1}{V_1 \cos \theta_c} - \left(\frac{h_1 \tan \theta_c - h_2 \tan \theta_c'}{V_2'} + \frac{h_2}{V_1 \cos \theta_c'} \right) \tag{3}$$

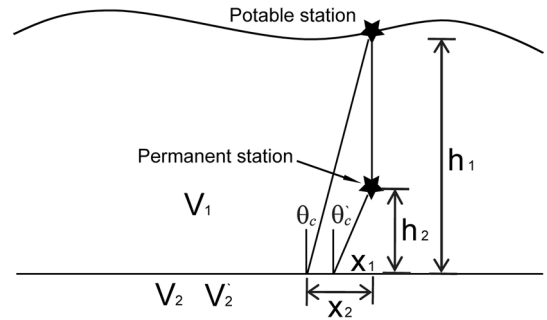


Fig. 4. Schematic diagram for the elevation correction. The average velocities of V₁ and V₂ from the velocity tomogram of KCRT-2004 are 4484 and 5964 m/s, respectively (Kim *et al.*, 2007). The correction values are in a range of -101.6 ~ 105.3 ms.

따라서 뚜렷한 속도차이를 보이는 지역에서 고도차가 있는 두 수신기의 고도 보정량은 각 층의 풍화대층 속도 V₁과 축선방향과 고정관측소방향의 기반암 속도 V₂와 V₂'을 알면 쉽게 구할 수 있다. 그러나 실제로는 고정관측소방향의 기반암 속도 V₂'를 알기 어려우므로 반복계산을 통해 고도보정량을 구하였다. 굴절면의 초기 속도값 V₁과 V₂ 값을 결정하기 위하여, KCRT-2004 축선자료의 초동주시를 역산하여 구한 종파 속도 토모그램 결과를 이용하였다(Kim *et al.*, 2007). 이 속도 토모그램은 전체 축선구간에 지하 2 ~ 3 km 부근에 매우 뚜렷한 속도 경계면이 존재하며, 이 경계면을 중심으로 상부층과 하부층의 평균속도는 각각 4484 m/s와 5964 m/s임을 보인다. 이 속도를 식 (1)에 적용하여 구한 각 고정관측소의 고도 보정량은 범위 -101.8 ~ 108.9 ms, 평균 8.2 ms, 표준편차 29.8 ms의 분포를 보인다. 이후, 고정관측소 방향으로 계산된 굴절면 속도 V₂'를 식 (3)에 적용하여 고도보정량을 재계산하였다. 2회 반복계산 후 고도 보정량은 범위 -101.6 ~ 105.3 ms, 평균 8.2 ms, 표준편차 29.2 ms의 분포를 보이며, 오차범위는 ±1 ms을 가진다.

관측소 잔여 보정

상부지각의 속도를 정확히 구하기 위해서는 관측소 하부의 풍화대 유무 및 두께변화에 따른 지연효과를 보정해 주어야 한다. 풍화대 하부 경계면이 관측소 하부에서 거의 수평하다고 가정하면, 관측소별 지연시간은 발파점에 따라 변하지 않고 일정한 값을 갖는다(Fig. 5). 따라서 어떤 관측소에서의 풍화대에 따른 보정량 Δt_s는 모든 방향의 가용한 발파자료를 대상으로, 고정관측소 주시와 이동관측소 주시 차이인 Δt_i를 발파점별로 평균한 값, 즉,

$$\Delta t_s = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n} \tag{4}$$

을 제거하는 방법으로 구할 수 있다. 여기서 n은 보정에 사용

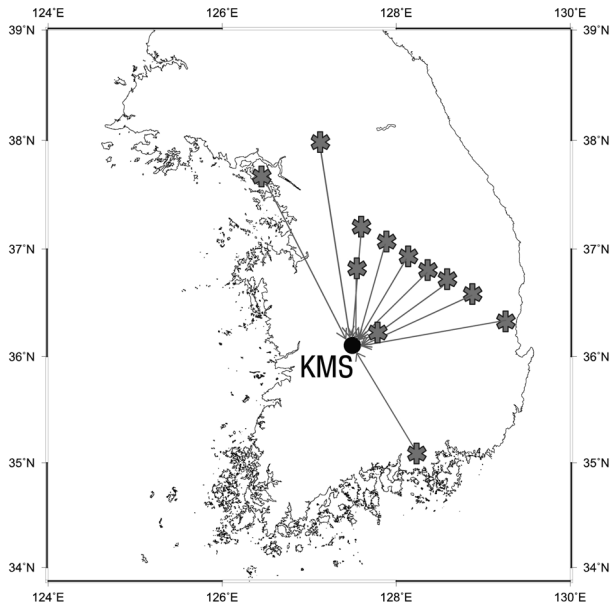


Fig. 5. Schematic diagram for the residual station correction. Symbol Δt_i indicates the traveltime differences between the profile and permanent station data. The correction values are in a range of $-89.6 \sim 192.2$ ms.

된 발파점의 개수이다. 이 연구에서 각 고정관측소에서 획득할 수 있는 자료는 최대 12개로, 자료분석은 관측된 자료의 수가 4개 이상인 고정관측소만을 대상으로 하였다. 이들 관측소별 보정량의 범위는 $-89.6 \sim 192.2$ ms, 평균값은 -12.1 ms, 표준편차는 39.5 ms이다. 가장 큰 양의 보정치는 JMJ 관측소로 192.2 ms이며, PHA도 119.2 ms에 달한다(Fig. 6). 그러나 관측소별 잔여 보정치는 고정관측소 뿐만 아니라 동일한 진앙거리를 갖는 측선상의 이동식 관측소의 부지효과의 포함되기 때문에, 고정관측소만의 절대적 부지효과를 나타내는 지표로 사용할 수는 없다.

역속도비 산출

상부지각의 속도 이방성 분석을 위하여, 하부지각이나 맨틀의 상부 경계면에서 굴절된 P*나 Pn 위상이 초동으로 도달하지 않는 진앙거리 120 km 이내의 156개 기록자료만을 분석대상으로 선정하였다(Table 1). 역속도비는 동일한 진앙거리를 갖는 두 자료의 (고정관측소 주시)/(이동관측소 주시) 비율로 구하였으므로, 이 값이 1.0을 초과하면 측선방향의 속도가 관측소 방향의 속도보다 큰 것을 의미한다.

자료 분석

총 156개의 고정관측소 Pg 위상 주시로 구한 한반도 남부지역의 역속도비는 95% 신뢰구간에서 0.999 ± 0.001 , 표준편차는 0.009로 계산된다. 즉, 측선방향의 종파 속도는 여러 방향의 고정관측소 평균보다 조금 작게 나타나는데, 이는 속도가 빠른

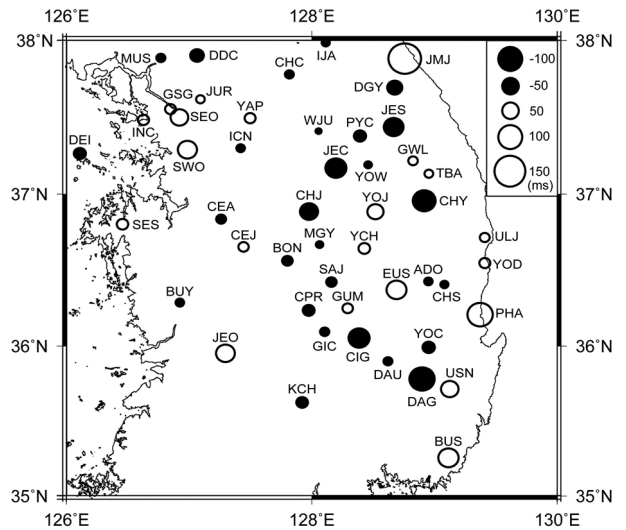


Fig. 6. Bubble plot of the station corrections. Negative and positive values are indicated with solid and empty circles, respectively.

측인 구조선 방향에 측선방향의 거의 수직으로 놓여 있는데 기인할 것이다(Thomsen, 1986 참조). 또한 그 차이가 0.1% 정도로 매우 작은 이유는 한반도 남부 상부지각의 종파 속도가 전반적으로 등방성임을 지지하는 것으로, 한반도 지각이 주로 고기 결정질암으로 구성되어 있고 최근 지각변동이 없었던 점과 관련이 있을 것으로 해석된다.

KCRT-2004 (Kim et al., 2007) 및 KCR2-2008 (Kim et al., 2009) 종파 속도 토모그램에서 직접파 도달구간에 해당하는 진앙거리 25 km 이내의 Pg 위상 주시 자료만을 대상으로 분석하면(Fig. 7a), 평균 역속도비는 95% 신뢰구간에서 0.997 ± 0.010 로 나타난다. 분석결과를 효과적으로 나타내기 위하여, 고정관측소 자료의 방위각과 역속도비를 극도형(polar plot) 형태로 도시하였다. 이 그림에서의 반지름은 역속도비를 나타내며, 방위각은 발파점에서 수신기를 향하는 각도이다. 대부분의 역속도비가 1.0에 가까운 값들을 보임에 따라 정확한 자료 분석을 위해 반경축의 범위를 0.9~1.0으로 설정하였다.

이 중, 2.0% 이상의 뚜렷한 역속도비 이상치를 보이는 파선 경로는 S1-DDC, S8-CHJ, S8-JEC 등이다. 이 중 6.0%의 가장 큰 이상치는 S1(연천) 발파점으로부터 남서쪽으로 12.1 km 떨어진 DDC(동두천) 관측소까지의 파선경로(S1-DDC)로, 추가령지구대와 일치한다(Fig. 1). 이러한 속도이상은 DDC 관측소와 거의 같은 방향에 위치하는 58.4 km 떨어진 SEO나 145.7 km 떨어진 SES 관측소에서 기록된 Pg 위상 자료에는 발견되지 않는데, 이는 추가령지구대가 동두천 지역으로부터 남서쪽으로 지표면에 흔적이 잘 나타나지 않는 것과 관련이 있을 것이다.

약 4.1%와 2.0% 빠른 속도를 갖는 S8-CHJ, S8-JEC 파선경로의 경우는, 발파점과 관측소가 모두 조산운동에 의해 형성된 변성 습곡대인 옥천계 및 그 경계에 분포하여, 옥천계 지층의

Table 1. Traveltimes (ms) of the Pg phase at selected permanent stations of the KMA network.

Shot Station	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
ADO	-	-	-	-	-	-	118750	-	72359	47227	3378	37947
BON	-	-	-	-	-	75504	58011	55028	61154	73376	97887	-
BUS	-	-	-	82399	-	-	-	-	-	-	-	120712
CEA	-	-	-	-	118097	53175	62819	81497	98562	119383	-	-
CEJ	-	-	-	-	-	-	62224	72737	-	-	-	-
CHC	65307	108220	-	-	120605	65430	79347	96617	112637	-	-	-
CHI	-	-	-	3214	-	-	-	-	-	-	-	-
CHJ	-	57269	-	-	49763	-	3951	3175	34517	88166	39033	-
CHR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	116003
CHS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57274	26612	-
CHY	-	-	-	-	-	119890	-	-	-	37884	40680	-
CIG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78246	75214	-
CPR	-	-	-	-	-	114576	93904	82657	-	78548	91434	-
CWO	36202	-	-	-	104485	97068	-	-	-	-	-	-
DAG	-	-	92233	97044	-	-	-	-	-	109517	89739	73693
DAU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80587	81905
DDC	2050	-	-	-	59404	90618	118595	-	-	-	-	-
DEI	-	-	-	-	55426	-	-	-	-	-	-	-
DGY	-	-	-	-	-	108273	97815	93916	-	107474	-	-
EUS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41745	30543	59998
GIC	-	-	-	-	-	-	110887	-	-	-	89800	-
GSG	-	-	-	-	37146	-	107443	-	-	-	-	-
GUM	-	-	-	-	-	-	-	-	69789	-	65968	96134
GWL	-	-	-	-	-	-	-	65647	56235	57551	70144	109439
HES	-	-	-	-	-	-	48240	-	-	-	-	-
HOC	-	-	-	-	-	-	-	84939	-	-	-	-
ICN	81780	52609	-	-	95101	3458	49287	75884	96589	-	-	-
IJA	-	-	-	-	-	96825	103994	-	-	-	-	-
INC	-	-	-	-	26234	92032	-	-	-	-	-	-
JEC	-	-	-	-	-	52387	28568	4110	36285	-	89597	-
JES	-	-	-	-	-	96812	79420	-	-	78644	96703	-
JEU	-	-	91263	-	-	-	-	-	-	-	-	-
JMJ	-	-	-	-	-	-	-	116015	118458	-	-	-
JUR	-	-	-	-	-	64059	93839	-	-	-	-	-
KMS	-	-	-	-	-	-	-	-	115063	-	-	-
KOJ	-	-	-	-	-	-	94010	-	-	-	-	-
MGY	-	-	-	-	-	73751	47865	33969	35291	47845	74775	-
MUS	-	-	-	-	36478	-	-	-	-	-	-	-
NOW	-	-	-	-	54405	-	-	-	-	-	-	-
PHA	-	-	-	-	-	-	-	-	116861	91500	60576	2684
PYC	-	-	-	-	-	71636	55554	50996	-	-	98683	-
SAJ	-	-	-	-	-	101748	60255	53504	-	52180	68372	107935
SEO	58452	-	-	-	45477	68726	98876	-	-	-	-	-
SES	-	-	-	-	97855	112945	-	-	-	-	-	-
SWO	81331	-	-	-	63760	56010	84495	-	-	-	-	-
TBA	-	-	-	-	-	-	94182	73169	60018	54766	60685	96153
UJN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	65408	-
ULJ	-	-	-	-	-	-	-	-	95049	73182	48223	42760
USN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99303	71514
WJU	-	-	-	-	-	44814	40025	51048	66117	89212	118171	-
YAP	-	-	-	-	94167	32390	58915	83838	-	-	-	-
YCH	-	-	-	-	-	97354	-	42934	26331	3211	42036	-
YJD	-	-	-	-	3820	-	-	-	-	-	-	-
YOC	-	-	-	-	-	-	-	-	111386	66805	52520	-
YOD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	76304	46612	4464
YOJ	-	-	-	-	-	-	59356	33142	2576	3172	46748	96931
YOW	-	-	-	-	-	-	51552	36860	-	52072	77343	-

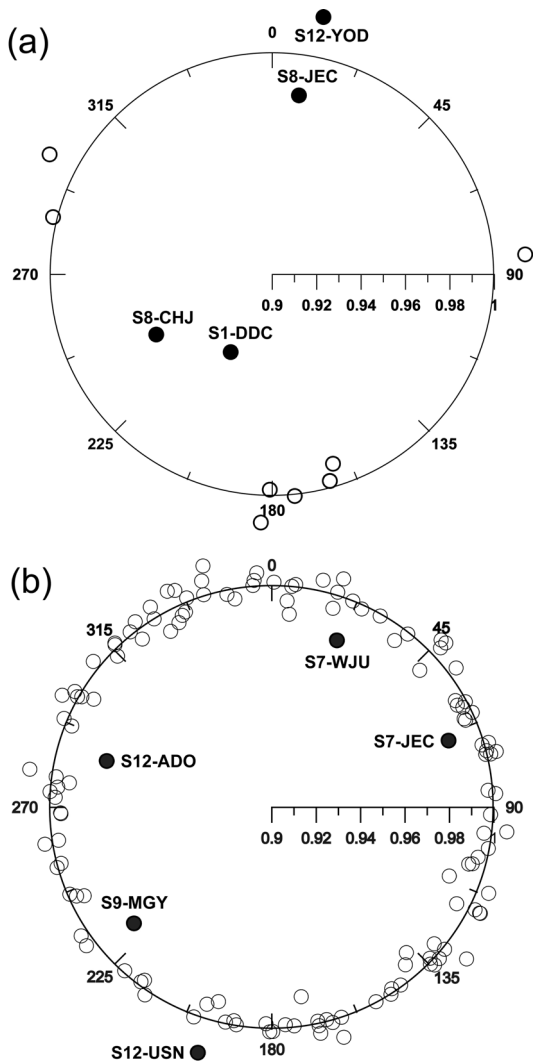


Fig. 7. Polar plots of slowness ratios for a epicentral distance (a) less than 25 km and (b) in the range of 25 ~ 120 km. Anisotropy values and azimuths of (a) 12 and (b) 185 source-receiver pairs are indicated as the radii and angles, respectively. The center value of the circle is set to 0.9 for easy recognition of relative anisotropy. Most data are marked near the circumference of radius 1, indicating overall isotropy. Anomalous ratios indicating relatively strong anisotropy are indicated with solid circles.

습곡이나 단층 등 주요 지질구조선 방향으로 속도가 빠르게 전파되는 것으로 해석된다. CHJ(충주) 관측소 주시자료는 23 km 떨어진 S7(충주)과 18 km 떨어진 S8(제천)과의 파선경로를 따른 역속도비가 각각 0.990과 0.959로 큰 차이를 보이는데, 이는 S7-CHJ의 파선경로가 옥천계 주향 방향과 거의 수직인 반면에 S8-CHJ의 파선경로는 옥천계 주향 방향과 일치하는 데 기인한다. 옥천계에서 실시한 MT탐사에서 90° 이상의 초과 위상이 나타나 옥천계 상부에 강한 전기적 이방성 매질이 존재함이 제시된 바 있다(이춘기 외, 2007).

또 다른 이상치인 S12-YOD 구간의 파선방향은 축선방향에 거의 수직임에도 불구하고 오히려 약 1.8% 정도 느린 속도를

갖는 특이한 양상을 보인다. 지체구조별로 단위면적당 지열에너지 부존량은 경상분지에서 가장 높은 값을 가지는데(Lee *et al.*, 2009), 이중에서도 발파점 S12로부터 고정관측소 YOD가 놓여있는 방향으로 가장 높은 지열 부존량을 보인다. 따라서 높은 지열에너지가 나타나는 S12-YOD 방향으로는 탄성과 속도가 낮게 나타나는 것으로 해석될 수 있다(Thomas and Thomas, 1994). 또한 진앙거리 25 km 이상인 S12-USN도 파선경로를 따라서도 약 1.4% 느린 속도이상치를 보이는데, S12-YOD 파선경로의 낮은 속도이상치와 마찬가지로 파선경로상의 높은 지열분포가 그 원인 것으로 해석될 수 있다.

깊이 2~3 km의 뚜렷한 속도 경계면에서 굴절된 진앙거리 25 km 이상의 주시자료 중 (Fig. 7b), 역속도비가 0.978인 가장 뚜렷한 이상치를 보이는 주시자료는 S12(영덕) 발파지점과 관측소 ADO(안동) 사이의 파선경로(S12-ADO)를 따른다(Fig. 1). 이 파선의 방향이 KCRT-2008 축선방향과 거의 동일함에도 불구하고 축선방향보다 약 2.2%의 빠른 속도를 갖는데, 이는 파선경로가 의성단층이 놓여있는 지표상의 위치와 거의 일치하여, 단층에 의한 속도 이방성으로 해석된다.

또한 발파점과 관측소가 모두 옥천계 및 그 경계에 분포하는 S7-JEC, S7-WJU, S9-MGY 등의 파선경로를 따라 1.5~1.9%의 빠른 속도이상치가 나타난다(Fig. 7b). 그러나 5개 발파점에서 25개의 주시자료를 이용한 깊이 2~3 km 굴절면에서의 종파 주시는 평균 역속도비 0.998 ± 0.003 , 표준편차 0.006으로 분석되어, 진앙거리 25 km 이내의 직접파 주시자료들보다 이방성이 미약한 편이다. 이는 지표 근처의 단열구조들이 깊이 증가에 따른 압력 증가로 대부분의 단열이 닫힘에 따라 이방성이 감소한 데 원인이 있을 수 있다.

결론

2004년과 2008년에 발생시킨 대규모 인공지진파 신호를 KCRT-2004와 KCRT-2008 축선과 기상청 지진망의 고정관측소에서 기록한 속도계 및 가속도계 지진계의 Pg 위상주시를 이용하여 한반도 남부 지각의 속도 이방성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 기상청 57개 고정관측소에서 기록한 198개 주시자료에 상대 고도보정 및 관측소 잔여보정을 실시하였으며, 보정량은 각각 -101.6 ~ 105.3, -89.6 ~ 192.2 ms으로 계산된다.
- 2) 진앙거리 120 km 이내의 Pg 위상의 역속도비는 95% 신뢰구간에서 0.999 ± 0.001 의 값을 보여, 옥천계를 제외한 한반도 남부 상부지각의 종파 속도가 대체로 등방성인 것으로 분석된다.
- 3) 직접파 Pg 위상 주시자료 분석결과, 추가령지구대와 일치하는 S1-DDC 파선경로를 따라 약 6%, 옥천계 구조선 방향으로 최대 4% 정도 빠른 속도 이방성이 관찰된다. 진앙거리가 25 km 이상의 주시자료에서는 의성단층을 따라 놓인 S12-

ADO 파선경로를 따라 2% 정도 빠른 속도 이방성이 나타난다. 그러나 지열이 높은 영덕과 울산부근에서는 1~2% 정도의 느린 속도 이방성이 나타난다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-5201)의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 기상청 지진망 고정관측소에서 기록된 지진자료를 사용토록 허락하여주신 기상청 관계자분께도 감사드립니다.

참고문헌

- 김정환 외 15인, 1999, 한국의 지질, 대한지질학회, 시그마프레스, 323-342.
- 김정환, 이재용, 기원서, 1994a, 백악기 부여분지의 구조적 진화, 지질학회지, **30**, 182-192.
- 나기창, 이동진, 1978, 홍제사화강암의 암석학적 연구, 지질학회지, **14**, 103-112.
- 송윤호 외 46인, 2008, 지하 열 자원 부존 활용 정보시스템 구축, 한국지질자원연구원.
- 이춘기, 이희순, 권병두, 조인기, 오석훈, 송윤호, 이태중, 2007, 자기지진류 탐사 자료에 나타나는 옥천계의 전기적 이방성 구조, 한국지구과학회지, **28**, 227-239.
- Ando, M., Ishikawa, Y., and Yamazaki, F., 1983, Shear wave polarization anisotropy in the upper mantle beneath Honshu, Japan, *J. Geophys. Res.*, **88**, 5585-5864.
- Babuska, V. and Pros Z., 1984, Velocity anisotropy in granodiorite and quartzite due to the distribution of microcracks, *Geophysical Journal International*, **76**, 121-127.
- Backus, G., 1965, Possible forms of seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans, *J. Geophys. Res.*, **70**, 3429-3439.
- Barruol, G. and Kern, H., 1996, Seismic anisotropy and shear-wave splitting in lower-crustal and upper-mantle rocks from the Ivrea Zone - experimental and calculated data., *Phys. Earth Planet. Inter.*, **95**, 175-194.
- Carbonell, R. and Smithson, S. B., 1991, Large-scale anisotropy within the crust in the Basin and range province, *Geology*, **19**, 698-701.
- Cho, H. M., Kim, H. J., Jou, H. T., Hong, J. K., and Baag, C. E., 2004, Transition from rifted continental to oceanic crust at the southeastern Korean margin in the East Sea (Japan Sea), *Geophys. Res. Lett.*, **5**, L07606.
- Eberhart-Phillips, D. and Henderson, C., 2004, Including anisotropy in 3-D velocity inversion and application to Marlborough, New Zealand, *Geophysical Journal International*, **156**, 237-254.
- Hess, H., 1964, Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans, *Nature*, **203**, 629-631.
- Hudson, J. A., 1981, Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks, *Geophysical Journal International*, **64**, 133-150.
- Ishise, M. and Oda, H., 2005, Three-dimensional structure of P-wave anisotropy beneath the Tohoku district, northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, **110**, 304.
- Jacob, A. W. B., Kaminski, W., Murphy, T., Philips, W. E. A., and Prodehl, C., 1985, A crustal model for a northeast-southwest profile through Ireland, *Tectonophysics*, **113**, 75-103.
- Jones, K. A., Warner, M. R., Morgan, R. P. L., Morgan, J. V., Barton, P. J., and Price, C. E., 1996, Coincident normal-incident and wide-angle reflections from the Moho: evidence for crustal seismic anisotropy, *Tectonophysics*, **264**, 205-217.
- Kim, K. Y., Lee, J. M., Baag, C. E., Jung, H., Moon, W., and Kim, J. Y., 2009, Crustal seismic experiment along the KCRT-2008 profile in the Korean peninsula, *AGU 2009 joint assembly in Toronto*, S13A-16.
- Kim, K. Y., Lee, J. M., Moon, W., Baag, C. E., Jung, H., and Hong, M. H., 2007, Crustal Structure of the Southern Korean Peninsula from Seismic Waves Generated by Large Explosions in 2002 and 2004, *Pure and Applied Geophysics*, **164**, 97-113.
- Lee, Y., Park, S., Kim, J., Kim, H. C., and Koo, M.-H., 2009, Geothermal resource assessment in Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, submitted.
- Rabbel, W. and Mooney, W. D., 1996, Seismic anisotropy of the crystalline crust: what does it tell us?, *Terra Nova*, **8**, 16-21.
- Savage, M., 1999, Seismic anisotropy and mantle deformation: what have we learned from shear-wave splitting?, *Reviews of Geophysics*, **37**, 65-106.
- Silver, P. G. and Chan, W. W., 1991, Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation, *J. Geophys. Res.*, **96**, 16429-16454.
- Thomas S. D. and Thomas, J. A., 1994, The temperature sensitivity of elastic wave velocity at high pressure: New results for Molybdenum, *Geophysical Research Letters*, **21**, 473-476.
- Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy, *Geophysics*, **51**, 1954-1966.
- Wang, J. and Zhao, D., 2009, P-wave anisotropic tomography of the crust and upper mantle under Hokkaido, Japan, *Tectonophysics*, **469**, 137-149.
- Zhao, D., Hasegawa, A., and Kanamori, H., 1994, Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic event, *J. Geophys. Res.*, **99**, 22313-22329.